干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

陕北黄土高原丘陵沟壑区聚落适宜空间模式研究
——以米脂县东沟为例

田达睿[1]， 唐 皓[2]， 谭静斌[3]

（1. 西安建筑科技大学建筑学院，西部绿色建筑国家重点实验室，陕西 西安 710055；
2. 深圳市蕾奥规划设计咨询股份有限公司，广东 深圳 518049；3. 长安大学建筑学院，陕西 西安 710061）

摘 要：黄土高原丘陵沟壑区是我国西部新型城镇化实践的克难攻坚地，在未厘清地域性特征的情况下，现代城乡规划设计的介入对当地环境和文化产生了较大冲击。以陕北米脂县东沟为例，基于卫星遥感影像、数字高程模型（DEM）等数据，利用格网法揭示东沟地形变化与聚落规模的空间分布特征，借助四象限散点图法和立体网格分维模型测度并评价东沟地形复杂性与聚落集聚性的耦合协调关系及聚落空间分布效率，总结适宜于沟壑区的聚落空间营建模式。结果表明：（1）东沟聚落从沟口至沟内存在明显的空间分异特征：如聚落逐步偏离河岸，其建筑密度和容积率呈现从高到低、再升高降低的变化等。（2）根据东沟地形复杂度与聚落集聚度的叠加分析，平缓地形中的集聚聚落与复杂地形中的分散聚落属于人地关系协调的聚落类型，这两类聚落约占所有聚落总规模的70.5%。（3）东沟聚落的立体网格分维数分段特征明显，其中台地行列式和自由行列式聚落的立体分维数最高，为2.35~2.55。（4）在5种东沟典型人居空间模式中，台地行列式、自由行列式及密集斑块式聚落具有人地协调、空间利用高效的双重特征，可作为丘陵沟壑区聚落空间营建的参考。

关 键 词：黄土高原丘陵沟壑区；聚落空间模式；人地协调；立体网格分维；米脂县

文章编号：

黄土高原是中华文明的重要发源地和生态脆弱区，特殊的自然与人文资源奠定了其在我国城镇化发展中的重要位置。丘陵沟壑区是黄土高原的重要组成部分，其传统城乡聚落的发展脉络是一个自发性更新和自组织的动态过程，这一过程凝结和传承了当地居民深厚的智慧结晶，塑造了具有地域特色的空间秩序与逻辑，逐渐形成一个包含有复杂元素和复杂关系的集合。由于缺乏科学有效的规划引导，近年来随着河谷城镇快速粗放地对外扩张，沟壑流域中浅山坡地逐渐出现利用大挖填、高切坡等方式建造的高层住区，呆板无序的建筑布局破坏了沟壑区原有的聚落空间肌理与尺度，传统聚落濒临老龄化和空废化，多元丰富的黄土高原人居空间特色与美感慢慢丧失，城乡建设的人地矛盾进一步加剧。因此，黄土高原丘陵沟壑区的人居环境建设难以直接运用平原地区的城乡规划技术经验，其城镇化亟需借鉴当地的人居智慧经验，以人、地协调为前提，挖掘并有效利用沟壑区内的空间潜力，从而探索出适宜于丘陵沟壑区的聚落空间组织模式。

为破解黄土高原人居环境难题，学者们积累了丰富的研究成果，提出诸多宝贵经验。首先，针对黄土高原丘陵沟壑区城乡空间分布特征与演化机制的研究较为丰富。学者们从不同视角分析了黄土高原丘陵沟壑区人居环境的时空分异特征[1-2]、人口收缩格局及其驱动力[3]。近年来，借助计算机技术和相关模型探讨黄土高原城乡演变动力的研究逐渐增多，如段小薇等[4]运用因子分析、地理探测器

收稿日期：2021-02-19； **修订日期**：2021-07-15
基金项目：国家自然科学基金面上项目（52078406）；中国博士后科学基金面上项目（2020M673358）；陕西省教育厅专项科研计划项目（19JK0457，20JK0719）；西安建筑科技大学新型城镇化专项科研基金（2021-3）资助
作者简介：田达睿（1984-），男，博士，副教授，硕士生导师，主要从事人居环境可持续规划设计研究. E-mail: tatary-tdr@163.com
通讯作者：谭静斌（1984-），女，讲师，博士研究生，主要从事可持续城市设计与规划管理研究. E-mail: tanjingbin84@163.com

等方法分析了聚落演化的特征及其影响因素；朱静静等[5]利用灰色系统关联模型揭示了黄土丘陵山区土地利用的空间自相关格局。其次，基于黄土高原复杂地形地貌和脆弱生态环境的人居空间形态与适宜发展模式一直是学者们的研究重点。宏观层面，既有研究较多从区域均衡协同[6-7]、有机生长[8-9]、分形理论[10-12]等视角探讨黄土高原河谷型城镇的适宜空间格局与城乡空间统筹发展模式，并构建了规划与评价方法[13-14]，如于汉学等[6]最早提出黄土高原沟壑区"大分散、大聚集"和树枝形多中心组团的城镇空间体系基本模式。微观层面，学者们主要围绕水资源[15]、生态单元[16]、塬-沟地貌景观[17-18]等提出聚落空间发展模式，如刘滨谊等[15]针对黄土高原水资源缺乏等问题构建了黄土高原半干旱区生态化水绿双赢的人居空间模式。

综上，目前针对黄土高原丘陵沟壑区人居环境的规划研究多集中于生态视角下的总体空间形态与发展模式，而以三维空间为基础、从城乡聚落与地形地貌的空间耦合关系出发探讨丘陵沟壑区人居空间营建模式的研究还很少，难以满足当前黄土高原复杂地貌区国土空间规划设计与导控的需求。本文以陕北米脂县东沟流域为对象，从三维空间视角分析丘陵沟壑复杂地形中人居聚落与地形地貌的协调关系及其空间效率，探索高效适宜的聚落空间布局模式。

1 研究区概况

米脂县位于陕西省北部、榆林市域东部，其所在的无定河流域沟壑纵横、河槽深切、梁峁交错、地表支离破碎，呈现出典型的黄土丘陵沟壑地貌特征。县城中心位于平坦的无定河河谷中，但无定河谷地面积仅有24 km^2，占全县总面积的1.94%，土地资源极为有限。

米脂县域内有10多条无定河支流，其中临近米脂县老城的"东沟"中聚落规模最大、类型丰富，其人地关系在黄土丘陵沟壑区中具有典型性。为确保聚落案例的多样性，本文研究范围以河沟为脉络，西至东沟与川道沟口处的宋家岭，东到七里庙村，长约4.7 km，南北涵盖沟壑两侧丘陵坡地，宽约600 m。(图1)

2 数据与方法

2.1 研究思路

本文以沟壑地形与当地聚落的"特征认知-耦合识别-绩效测度-模式提取"为逻辑主线开展研究。首先，采用格网分析法在研究区内绘制282个100 m×100 m的格网覆盖整个区域，将研究对象化整为零，利用样点方格(后文简称"样方")的指标值定量描述并揭示研究区内地形变化与聚落规模的空间分布特征。在此基础上，从人地耦合协调关系、三维空间利用效率2个层面对聚落进行评价，主要运用四象限散点图法将地形复杂程度和聚落集聚程度进行叠加和类型化分析，识别出人地协调的聚落样本，并借助立体网格分维模型分析聚落样本的空间分布效率，进而在人地协调聚落类型中择取高分维样本作为较优空间范本，由此提取并归纳适宜丘陵沟壑区的聚落空间模式。(图2)

2.2 数据来源

本文基础数据包括地形地貌和聚落建筑两大类。首先，在地理空间数据云平台中下载数字高程模型(DEM)数据，利用GIS空间分析工具生成坡度和坡向等矢量图(图3)。其次，基于实地调研，结合

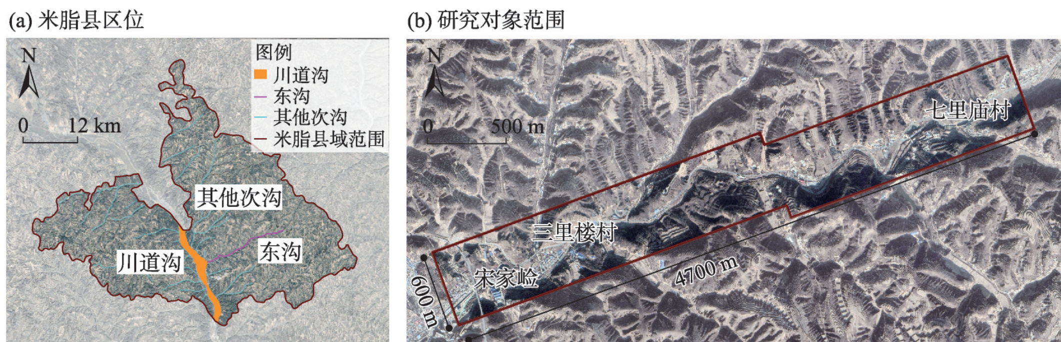


图1 米脂县区位及研究对象范围

Fig. 1 Location of Mizhi County and range of the study object

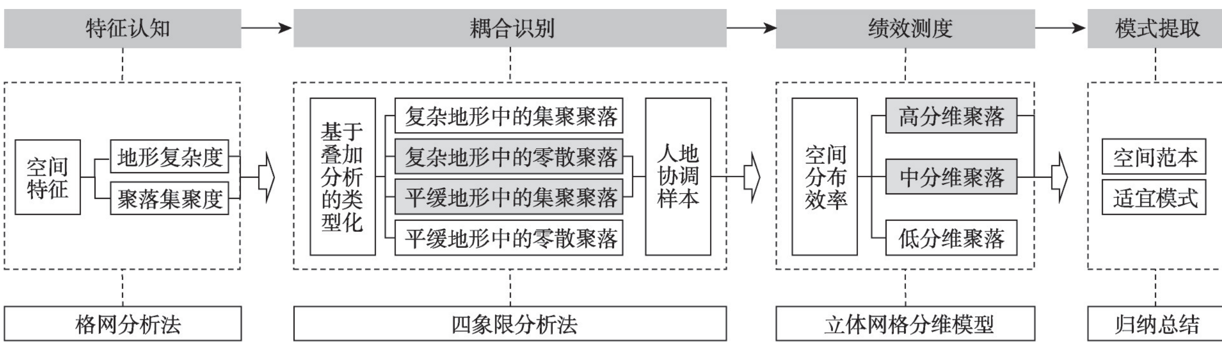


图2 研究设计框图

Fig. 2 Research framework

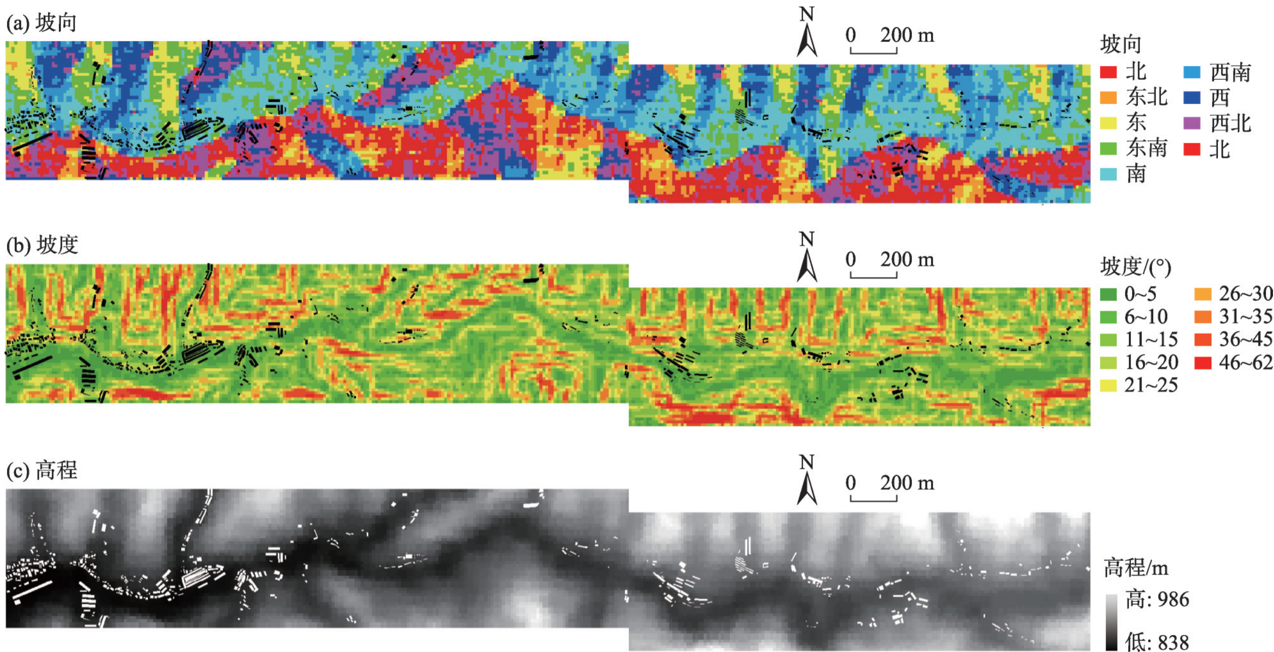


图3 研究区地形数据

Fig. 3 Topographic data of the study area

卫星遥感影像、现状CAD图修正等获得聚落建筑的平面图，并运用Sketch Up阴影模拟法和太阳高度角计算法的相互检验和校正，得到研究区内建筑的高度数据。最后，通过地形和建筑的高程数据拟合生成东沟的三维空间形态图(图4)。

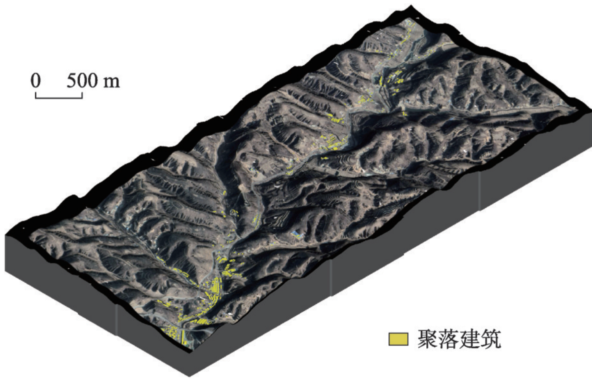


图4 研究区地形与聚落三维数据拟合图

Fig. 4 Three-dimensional map of topography and settlements in the study area

2.3 研究方法

2.3.1 *次沟地形复杂程度的测算* 地形复杂性是影响黄土高原丘陵沟壑区人居空间建设的关键因素，以往研究中基于单一高程或坡度的分析无法综合地体现地形因子对聚落分布的复杂作用。近年来，地理学和地貌学引入地形起伏度和地形位指数来描述区域地貌形态、划分地形等级，从而更深刻地

反映地形等自然因素的复杂变化对人居空间格局的影响[19-21]。

地形起伏度也称相对高度，是指在一个特定的区域内所有栅格中最大与最小高程之差[22]，能直观地反映区域内地势起伏特征。为准确和完整地呈现地形特征，常采用滑动窗口分别计算不同窗口大小的地形起伏度，并确定平均地形起伏度的最佳统计窗口面积。本文利用人工判断变点法确定研究区的最佳统计分析窗口为11×11矩阵，对应最佳统计范围的面积为0.0189 km²。

地形位指数是通过坡度和高程2个变量的组合对地形特征进行综合描述，高程越高、坡度越大的点，其地形位指数越大，地形变化越复杂，越不利于城乡开发建设。计算公式如下[23]：

$$T = \ln\left[\left(\frac{E}{\bar{E}}+1\right)\times\left(\frac{S}{\bar{S}}+1\right)\right] \tag{1}$$

式中：T表示地形位指数；E表示任意点的高程值(m)；$\bar{E}$表示计算单元内的平均高程值(m)；S表示任一点的坡度值(°)；$\bar{S}$表示计算单元内的平均坡度值(°)。

2.3.2 次沟聚落集聚规模的测算 聚落的集聚规模反映了聚落建筑群在单位空间内的分布数量，本文采用建筑密度和容积率2个指标进行表征。建筑密度指在一定范围内建筑物的基底面积总和与用地面积的比值，反映了研究范围内的建筑密集程度和空地率。容积率指一定范围内地面以上各类建筑的建筑面积总和与用地面积的比值，用以衡量建设用地的使用强度。

2.3.3 地形复杂度与聚落集聚度的综合指数 为分析东沟地形复杂性与聚落集聚性之间的耦合协调关系，本文借助综合指数法分别将地形起伏度和地形位指数、聚落建筑密度和容积率拟合成综合指标。先用极差标准化法对地形位指数、地形起伏度、建筑密度及容积率等指标进行无量纲标准化处理，并通过变异系数法确定各单项指标的权重，再分别计算研究区各样方的地形复杂度综合指数与聚落集聚度综合指数。计算公式如下：

$$C = \sum_{i=1}^{n} X_{ij}{}' W_i \tag{2}$$

式中：C为若干指标的综合指数；i为某项指标(i=1，2，3，…，n)；W_i为第i项指标所占的权重；$X_{ij}{}'$为标准化处理后j样本对应的第i项指标值。

2.3.4 聚落空间的立体网格分维模型 分形理论作为研究复杂系统的前沿理论，为城乡空间形态研究提供了新的视角与方法[24]。分维数是反映分形体空间特征和分形状态的核心指标，其中网格维数是迄今在各学科领域中应用较为广泛的一种分维模型，揭示了系统对空间的填充能力[25-26]，常作为评判和比较空间效益的综合定量指标。丘陵沟壑地貌影响下的聚落具有复杂的竖向变化特征，因此，本文将平面的网格分维数测度原理向三维空间扩展，利用立体网格分维模型评价沟壑区聚落的空间利用效率。

该模型定义如下：用长宽为L、高为H的立方体覆盖聚落的三维空间，量测该聚落所需立方体数目为$N_{(1)}$=1；再将立方体长、宽、高各边二等分，划分为8个相等的、边长为$L/2$、$L/2$和$H/2$的立方体，计算包含聚落建筑的非空立方体数目$N_{(1/2)}$；之后，进一步将8个小立方体各边二等分，划分为64个边长为$L/4$、$L/4$和$H/4$的小立方体，非空立方体数目计为$N_{(L/4)}$。以此类推，不断重复上述操作，将原立方体不断分解，到第n步时，非空立方体数目计为$N_{(1/2^{n-1})}$。如果聚落在三维空间中是分形的，根据分形一般规律$A_{(kn)} \propto k^{\pm\alpha} A_{(n)}$(其中，$k$为常数，$\alpha$为标度指数，即分形学中的分维数)，则三维尺度$r$与其对应的非空立方体数$N_{(r)}$应满足下式：

$$\ln N_{(r)} = -D_3 \times \ln r + A \tag{3}$$

式中：r为等差序列尺度；$N_{(r)}$为r尺度下所对应的非空立方体数(个)；D_3为立体分维数；A为常数。

将($N_{(r)}$，r)点列转化到双对数坐标图上，这些点会沿一条直线分布，这条直线的斜率即为研究对象的立体分维数。结合平面网格分维的空间内涵，立体网格分维模型反映了立方体尺度与对应要素数目递增关系的变化率，揭示了研究对象三维空间的填充度与空间分布效率，该值越大说明聚落分布更为高效和紧凑。限于立方体标尺分辨率递减和数量倍增的计算量，本研究选择9组边长依次对半折减的立方体标尺测度聚落样本，统计各样本在不同标尺下对应的非空盒子数；再使用最小二乘法将无尺度区内的点列进行线性拟合。

3 东沟地形与聚落的空间分布特征

3.1 东沟地形复杂性的空间特征

通过对地形指标数据的格网化，可清晰地显示

东沟地形复杂变化的空间特征。

首先，研究区内地形起伏变化丰富，地形起伏度的高、中、低比例较为均衡。根据中国数字地貌制图规范中的分级标准，利用自然间断点法和重分类工具将研究区的地形起伏度划分为5个区段：平坦(0~30 m)、微起伏(31~40 m)、小起伏(41~50 m)、中起伏(51~60 m)和高起伏(61~90 m)。约43.6%的样方地形起伏变化较小(起伏度≤40 m)，约30.1%的样方地形起伏度(41~50 m)居中，约26.2%的样方地形起伏度(≥51 m)较高(图5a、c)。

其次，各样方的地形位指数在总体空间分布上呈现出“近水低、远水高；高、低南北交错”的沟谷特征。地形位指数从河岸向两侧逐渐增高，指数较低的样方(0.85~1.28)约占总样方数的36.9%，且大多沿河沟连续分布，形成平缓的河岸地带。在研究区西段(0~2.0 km)和东段(3.4~4.7 km)，河沟两侧地形位指数低的样方较为集中，沿河形成100~150 m宽的平缓地区，且在河岸南、北两侧呈交错分布；在中段(2.0~3.4 km)河沟两侧地形位指数较低的区域逐渐收窄，地形复杂度增加(图5b、d)。

3.2 东沟聚落集聚性的空间特征

3.2.1 区间特征 研究区内约42.6%的样方存在建筑和人工建设，即含有聚落建筑的样方的总体占比较高，说明东沟中人居建设对土地的占用比较分散。按照自然间断点法对含有建筑的样方的指标数据进行区间划分，可以发现：研究区建筑密度样方可分为5个区间，其中约58.3%的样方建筑密度较低(≤5%)，约21.7%的样方建筑密度较高(≥11%)；研究区容积率样方可分为3个区间，其中约75.0%的样方容积率极低(≤0.10)，约21.7%的样方容积率较低(0.11~0.30)，仅3.3%的样方容积率在0.31~0.50区间。可见，东沟内低层、低开发强度的聚落较为普遍，但也有少量聚落以较高的建筑密度和容积率聚集分布(图6c~d)。

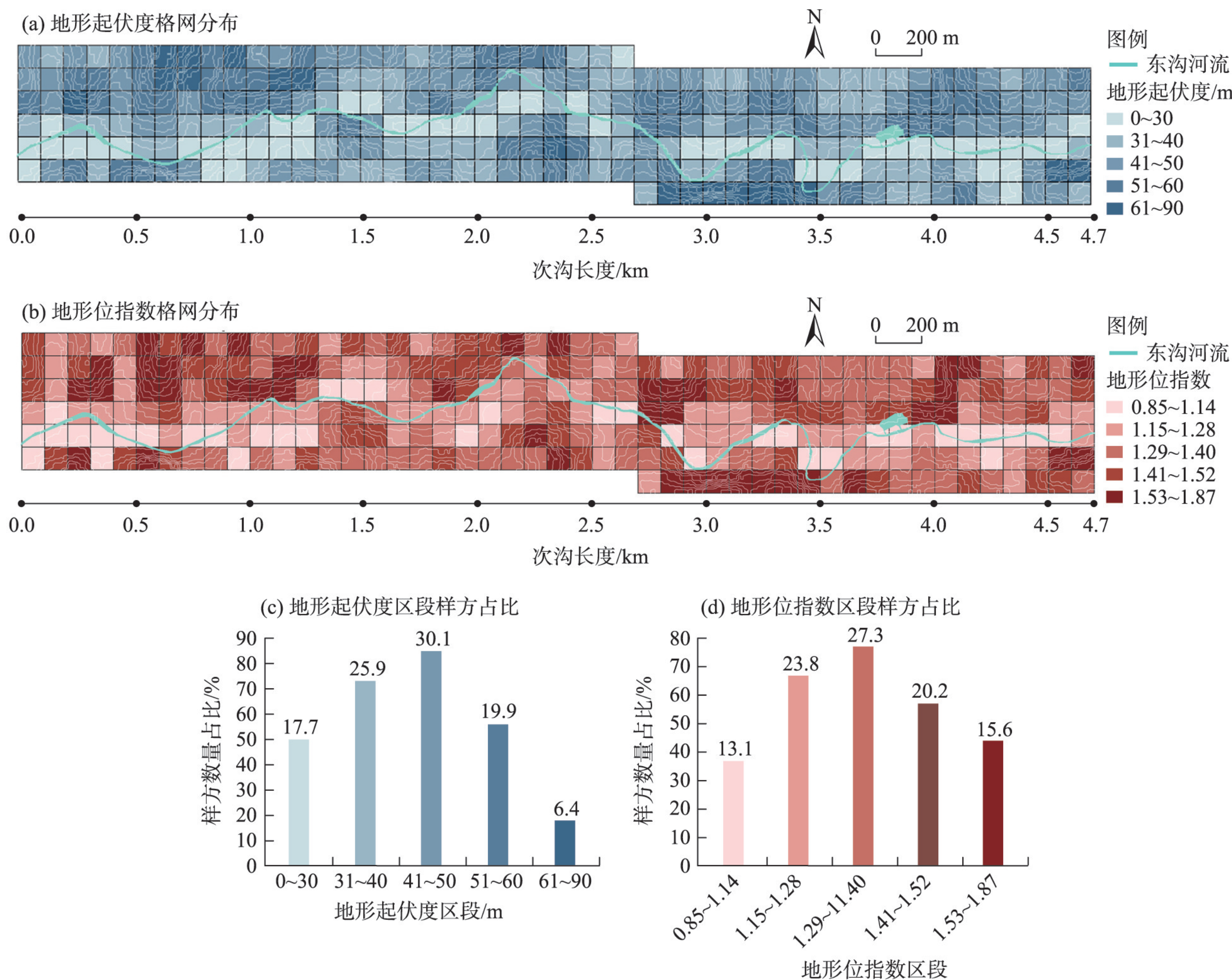


图5 地形起伏度、地形位指数格网图及其各区段样方占比

Fig. 5 Lattice charts and quadrant proportions of land relief and terrain niche index

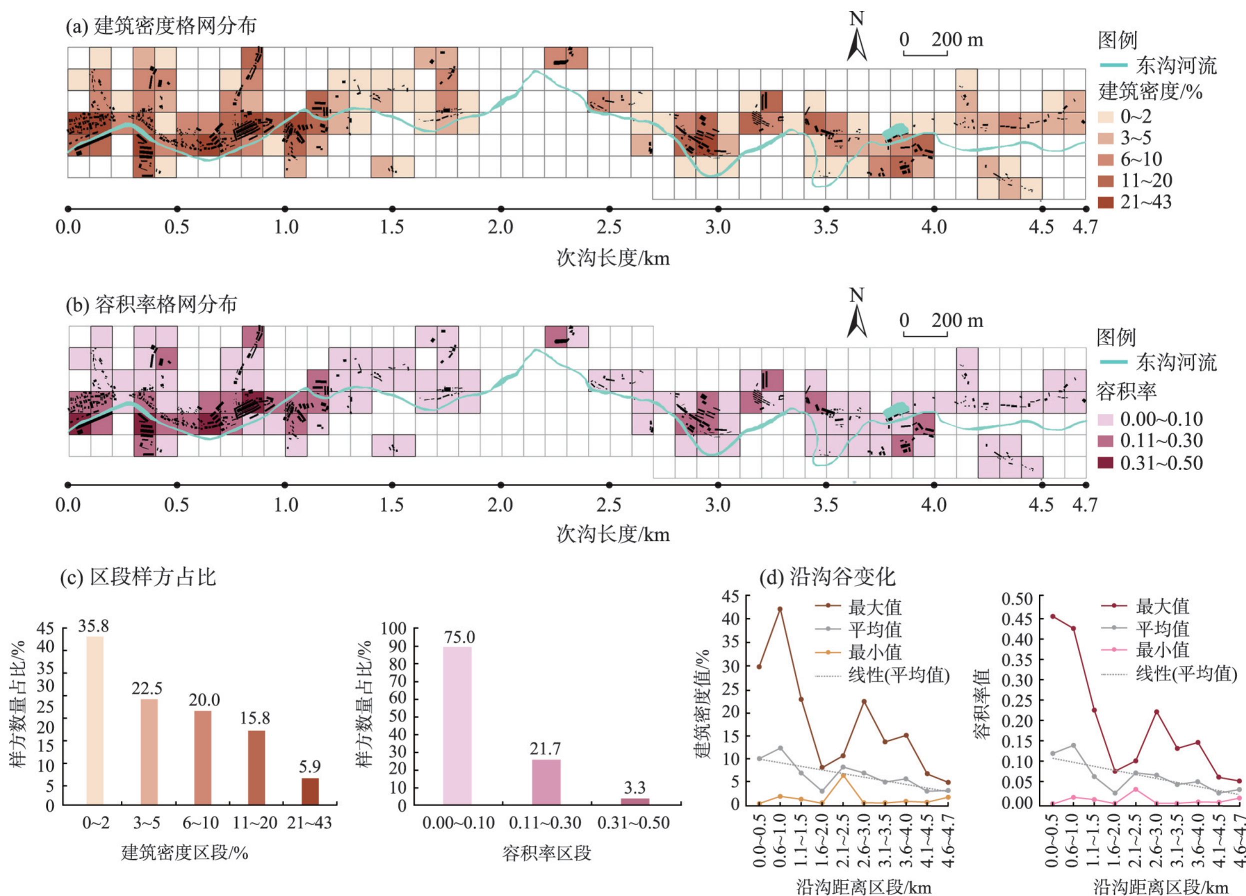


图6 建筑密度、容积率格网图及其各区段样方占比和沿沟谷变化

Fig. 6 Lattice chart, histogram and line chart of building density and floor area ratio

3.2.2 分布特征 首先,研究区内样方的建筑密度和容积率从西向东总体呈现"先高后低再高又低"的区段分异特征。具体而言,靠近川道与东沟交叉的沟口地段(0.0~1.2 km范围)存在明显的建筑集聚,随后建筑密度和容积率降低,在中间1.8~2.4 km区段几乎没有人居建设,在2.8~4.0 km区段建筑密度和容积率又逐步增高,形成东沟沿线第2个聚落集聚区段,随后再度降低(图6a、b、d)。

其次,研究区内人居建设总体上临近河沟分布,但随着东沟的深入会逐步偏离河岸,自西向东呈现出"从近水到远水"的分布变化。基于格网数据分析:建筑密度≥11%的高值样方中有92.9%位于河沟100 m缓冲带内,容积率≥0.11的中高值样方中有86.7%位于河沟100 m缓冲带内;其中,在西侧靠近沟口段,建筑密度和容积率的高值样方均紧贴河沟,中段和东段的高值样方则逐渐偏离河沟约50~100 m(图6a~b)。

最后,聚落在东沟流域层面呈现"整体分散、点状集聚"的分布态势。建筑密度与容积率样方的空间分布以高峰值样方为点状核心,从中心向外圈层式递减,在沿河段形成若干集聚的建筑群落(图6a~b)。

4 东沟地形与聚落的耦合协调关系

4.1 聚落与地形空间叠加的4类人地关系

以各样方地形复杂度综合指数的平均值、中位数等为参考,将研究区所有样方的地形复杂程度分为高、低两级,地形复杂度综合指数的高值样方与低值样方各占约50.0%。同理,将120个含有建筑的样方按聚落集聚度综合指数划分为高、低两级,聚落集聚程度较高的样方占34.2%,集聚程度较低的样方占65.8%(图7a~b)。

通过对样方地形复杂度综合指数与聚落集聚度综合指数的空间叠加,依据"地形复杂度高、低-聚落集聚度高、低"的数据分布,利用四象限散点图法将样方分为高-高、高-低、低-高、低-低4种叠加

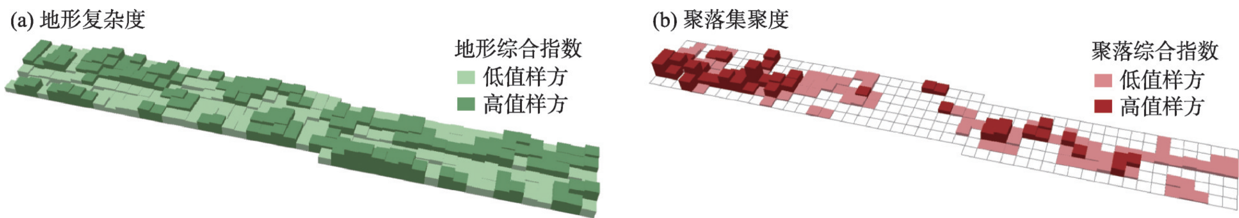


图7　地形复杂度、聚落集聚度综合指数格网图

Fig. 7　Lattice charts of terrain complexity index and settlement scale index

类型，代表4种不同的人地关系：复杂地形中的集聚聚落、复杂地形中的分散聚落、平缓地形中的集聚聚落、平缓地形中的分散聚落(图8a)。

4.2　人地叠加类型的分布特征

首先，按照4类样方的数量比例统计，各类样方占比的排序为低-低型>高-低型>低-高型>高-高型。其中，低-低型样方数占37.5%、高-低型样方数占28.3%，说明研究区内分散的聚落单元比重较高，且在复杂地形与平缓地形中均有分布(图8b)。

其次，按照样方中聚落建筑的占地面积统计，各类样方占比的排序为低-高型>高-高型>低-低型>高-低型。其中，低-高型样方的聚落规模比例最高(约59.5%)，即24.2%的样方内占据了59.5%的聚落面积，其他3类样方的建筑规模比例较为均衡(各约占11.0%、14.3%和15.2%)，说明平缓地形中的集聚聚落是研究区内人居建设的重要形式，大多数集聚聚落避开了地形地貌特别复杂的地段(图8b)。

再次，相同类型的样方在空间分布上具有一定连续性和聚合性。例如，低-高型样方大多以“田”或“L”形集聚分布，在地形平缓地区形成若干聚落中心；低-低或高-低型样方与之相邻，围绕低-高型样方分布，形成从集中到分散的过渡区域；少量高-高型样方则分布在外围(图8c)。

4.3　人地协调的典型聚落样本

从人、地的耦合协调性而言，平缓地形区适宜较高规模的集聚化建设、复杂地形区则应分散化布

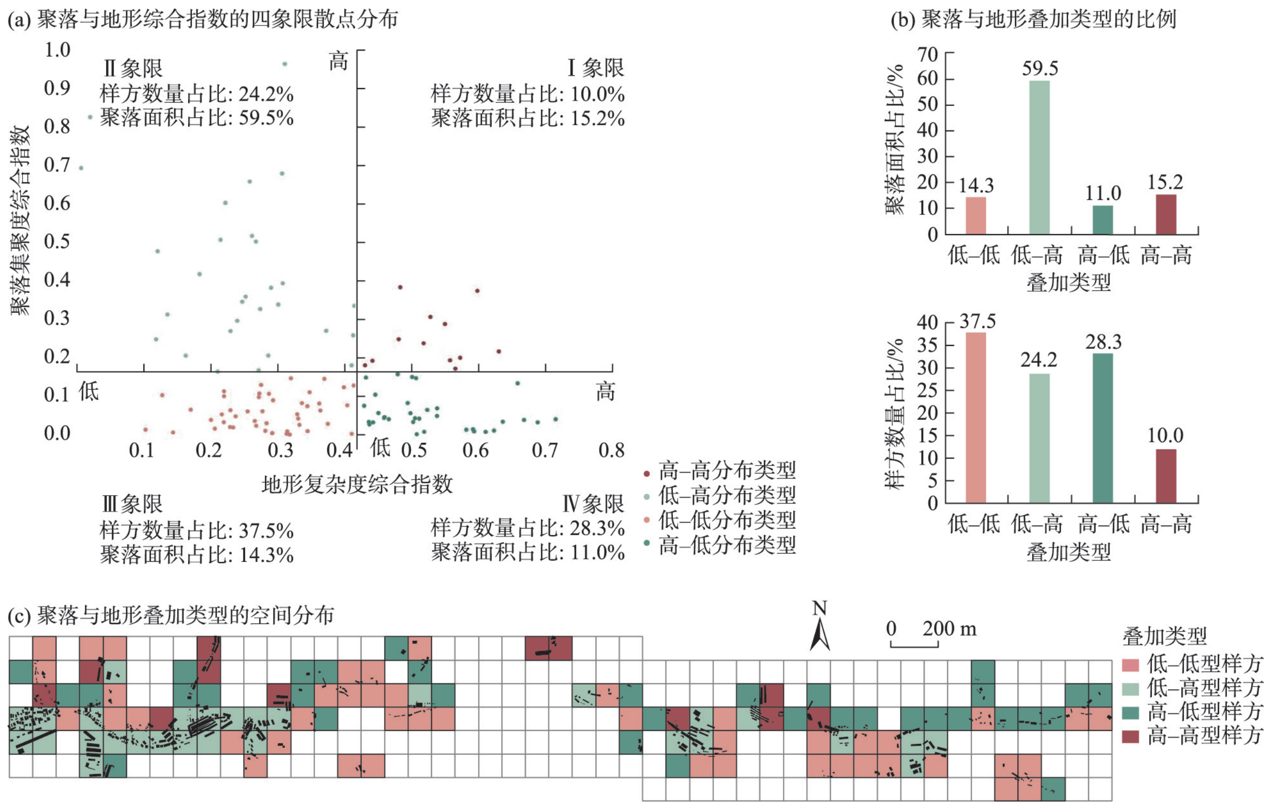


图8　地形复杂度、聚落集聚度综合指数叠加分析

Fig. 8　Overlay analysis of terrain complexity index and settlement scale index

局,地形复杂区的大规模人工建设和地形平缓区的分散布局都不适应沟壑区生态环境脆弱与可建设用地资源稀缺的地域特点。因此,从4类人地叠加关系中剔除高-高型和低-低型样方,留下29个低-高型样方和33个高-低型样方;为确保聚落建筑群组的连续性和完整性,将相邻的同类样方进行合并、将部分样方边缘适当扩展,形成由不规则样方组成的"人地协调聚落样本",其中高-低型聚落样本16个,低-高型聚落样本16个(图9)。

5 基于三维空间高效分维的聚落择优模式

5.1 人地协调聚落样本的立体分维数计算结果

运用立体网格分维模型测度32个"人地协调聚落样本"的立体分维数和拟合优度(R^2)(图10)。根据计算结果:首先,32个样本中有9个高-低型样本和1个低-高型样本的R^2<0.995,说明较多高-低型

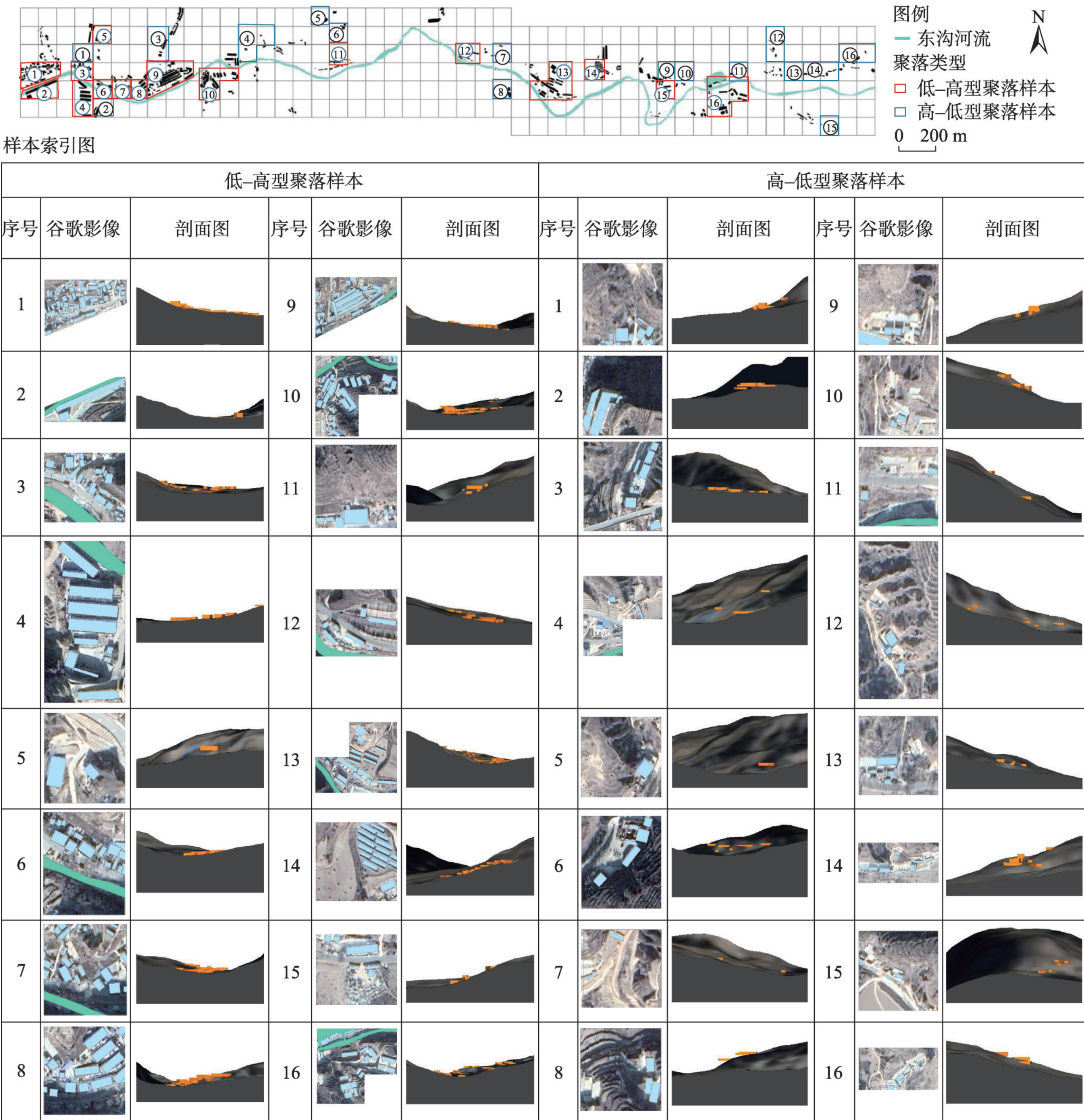


图9 人地协调的典型聚落样本

Fig. 9 Typical samples of settlements adapted to the terrain

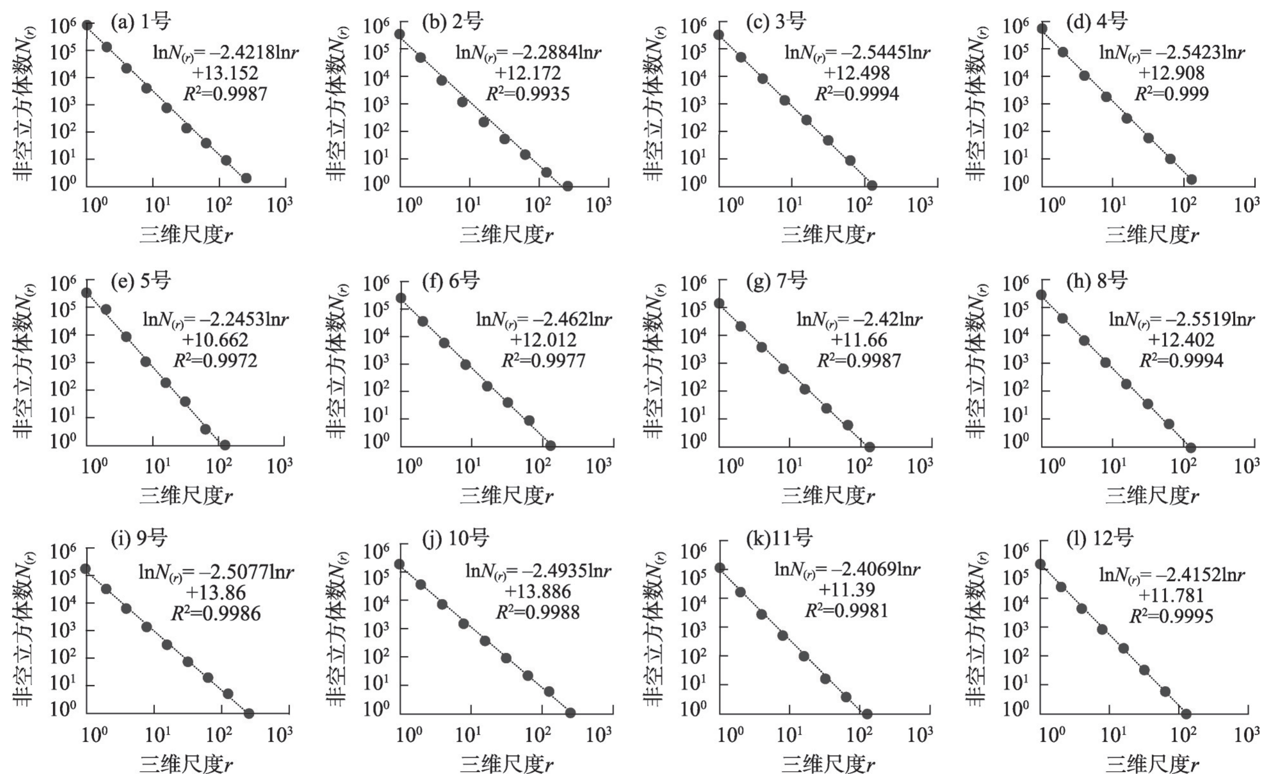


图10　低-高型样本的立体分维数测算结果(节选)

Fig. 10　3D fractal dimension of low-high samples (excerpts)

样本的三维形态不满足分形分布的规律要求，而绝大多数低-高型样本的三维形态具有分形特征。其次，通过拟合优度检验的聚落样本的立体分维数分布在2.05~2.55之间，说明东沟中各样本建筑布局的三维空间效率差异较大(图11)。

5.2　基于三维空间分布效率的样本择优

利用自然间断点法将通过拟合优度检验的样本的立体分维数划分为3个区间，其中高分维区间为2.35~2.55，样本数占总数的27.25%；中分维区间为2.15~2.34，样本数占总数的45.50%；低分维区间为2.05~2.14，样本数占总数的27.25%(图11)。

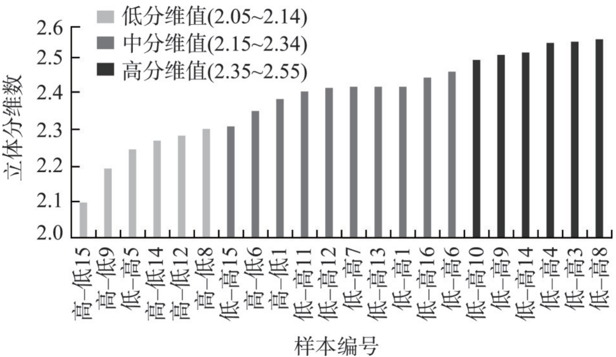


图11　人地协调聚落样本的立体分维数排序与分区段

Fig. 11　Sorting and grading of settlement samples by 3D fractal dimension

首先，在高分维区间中，低-高8号、低-高4号、低-高14号和低-高9号样本具有相似的三维空间形态，其布局可归纳为台地行列式聚落，即建筑群组顺应等高线在丘陵坡地上紧密、平行排列，并随着地势升高而逐级抬高，如典型的退台式窑洞群三里路村(图12a)。这类样本呈现出高分维效果，表明台地行列式建筑沿地形在平面扩展的同时，在竖向上通过错落叠加等手法实现紧凑高效的布局效果(表1)。

此外，以低-高3号、低-高10号、低-高16号和低-高13号样本为代表的自由行列式聚落亦具有较高的立体分维数。这些样本中的建筑群随地形变化在平面上呈曲线排布，形成多个朝向的行列式组群；建筑间距较大、高度变化较丰富。其空间布局比单方向的台地行列式更为灵活自由，但在三维空间的集聚性上略低(图12b、表1)。

其次，在中分维区间中，以低-高6号、低-高1号、低-高7号和高-低1号样本为代表，其具有建筑单体尺度小、在有限的平缓地形中密集分布、整体



图12　各类型聚落实景照片

Fig. 12　Photos of three kinds of settlements

表1　人地协调聚落的样本原型、分维数及空间模式

Tab. 1　Prototype, fractal dimension and spatial pattern of settlements adapted to the terrain

模式名称	立体分维数	模式示意图		对应样本编号	典型样本	
		平面	剖面		平面肌理	轴侧
台地行列式	2.51~2.55			低–高8 低–高4 低–高14 低–高9		
自由行列式	2.42~2.54			低–高10 低–高3 低–高16 低–高13		
密集斑块式	2.33~2.46			低–高6 低–高1 低–高7 高–低1		
散点式	2.25~2.30			低–高5 高–低8 高–低12		
线形展开式	2.10~2.27			高–低14 高–低15		

竖向落差小等特征，如东沟宋家峪（图12c），可归纳为密集斑块式聚落，该类型样本的三维空间分布效率低于行列式聚落（表1）。

最后，在低分维区间中，部分样本如低–高5号、高–低8号、高–低12号等以3~5栋单体建筑分散在多变的地形环境中，大多为单体窑洞、个体村户、寺院等，可归纳为散点式聚落；还有一些样本如高–低14、高–低15号等沿河流或者道路等线形要素呈

“一”字依次排布，局部错位分布，可归纳为线形展开式聚落。这2类聚落的三维空间分布效率最低（表1）。

5.3 东沟聚落适宜空间模式总结

丘陵沟壑地貌的破碎化造成水土资源的分散化和低承载力，使东沟内人居空间在长期演化过程中容易形成零散的布局类型，如散点式和线形展开式等聚落，其在一定程度上与当地自然环境和传统的农业生产方式相适应，但过度分散和孤立的建设模式导致土地资源的空间利用效率极低、小流域中村镇之间的沟通与协作不便、基础设施和公共服务设施难以配置等问题。

随着人们与沟壑环境的相互适应，东沟内部分聚落依托丘陵坡地在三维空间中适度集聚和生长，形成台地行列式、自由行列式和密集斑块式等聚落空间类型。首先，台地行列式聚落的优势体现在依山而建，建筑与街巷平行于山地等高线形成层层叠落的立体复合式多层建筑群，因排列紧密而具有很高的空间占据效率。其次，为顺应复杂多变的地形，自由行列式聚落的空间布局更加灵活，建筑依地势高低错落，呈非规则阶梯状分布，与地形的空间关系更加融合，并具有独特的聚落景观美感。最后，密集斑块式聚落往往在微丘缓坡处集聚发展，在空间组织上具有更丰富的多样性，高密度的建筑组群结合街巷、院落、广场等要素的组织，形成尺度宜人、类型丰富的景观环境，隐含着复杂的空间秩序与逻辑；但该类型的空间利用效率略低于前两者，且受地形地貌等自然环境的限制较大，地形的高低变化、迂回曲折都制约了该类聚落的空间生长。

总体而言，上述3类聚落具有相对较高的空间利用效率，可缓解丘陵沟壑区建设空间不足的压力，还有助于在沟壑流域整体尺度上形成“大分散、小集聚”的带状簇团型空间格局，是沟壑流域中既尊重自然本底、又保证集聚效益的聚落空间布局模式。因其特点不同，规划设计应根据不同的微观地形环境和地方发展需求择取适宜的空间模式。

6 讨 论

随着陕北黄土高原人居环境破坏自然环境、现代城镇冲击传统聚落的矛盾日益凸显，合理利用丘陵沟壑区空间潜力，探索城乡融合、人地共生的沟壑聚落空间模式十分紧迫。尽管有学者针对该问题进行了探索，如惠怡安[18]提出可以适度利用川谷中的坡、峁、沟涧地作为城乡建设用地，形成黄土高原丘陵沟壑区独特的空间拓展模式；刘滨谊等[15]针对黄土高原水资源缺乏等问题，构建了黄土高原半干旱区生态化水绿双赢的人居空间模式；刘晖[16]以小流域土地空间为单元，提出由人居建设、人居支持和自然支撑系统组成的人居生态单元模型。但这些空间模式更注重对生态本底的尊重，而未关注聚落布局的空间效率。

在陕北黄土高原丘陵沟壑等复杂地形地貌区，人居环境在长期演化中呈现出越来越强的三维空间特征；为了提高此类地区城乡空间利用和空间配置效率，聚落立体有机增长及其分形分析成为该地域人居环境形态学研究的重要内容之一。本文采用格网分析法和立体分维模型分析评价了沟壑区人、地协调关系及聚落的三维空间利用效率，从当地传统人居环境中总结出台地行列式、自由行列式、密集斑块式3种高效适宜的聚落营建模式，并提出“基于人地耦合的立体高分维聚落空间拓展”是应对黄土高原丘陵沟壑区城乡空间发展瓶颈及人地矛盾等问题的重要突破口。

需要指出的是，黄土高原上千条沟壑中长久以来形成的聚落空间类型不仅限于文中所列，本文仅以米脂东沟为例进行方法的探索和个案模式的总结，后续研究仍需在大量沟壑流域中搜集更多的聚落样本、进一步挖掘其空间组织逻辑与生成机制，总结黄土高原人居营建的地方经验与智慧。

7 结 论

通过对米脂县东沟人地关系的研究，主要得出以下结论：

(1) 在沟壑特征明显的东沟研究区内，聚落规模从沟口至沟内沿线存在明显的空间分异特征。东沟中聚落的建筑密度和容积率从西向东呈现从高到低、再升高降低的变化，沟口地段(0~1.2 km范围)和沟中段(2.8~4.0 km范围)形成聚落集聚区段。此外，沟口段的聚落大多紧邻水系，但随着东沟的深入，在中段和东段的聚落则逐渐偏离河岸约50~100 m。最后，聚落在沟壑流域层面呈现“整体

分散、点状集聚”的分布态势。

（2）根据地形复杂度综合指数与聚落集聚度综合指数的叠加分析，归纳出4类人地关系：平缓地形中的集聚聚落、复杂地形中的分散聚落、复杂地形中的集聚聚落、平缓地形中的分散聚落。前两者为人地关系耦合协调的聚落类型，尤其平缓地形中的集聚聚落在各类型聚落总规模中占比最高，约为59.5%，其余3类的规模占比较为均衡，分别为11.0%、14.3%和15.2%。

（3）根据立体网格分维模型测算结果，东沟聚落的三维空间分布效率差异明显。台地行列式和自由行列式聚落具有高立体分维特征，样本的立体分维数在2.35~2.55区间；密集斑块式聚落的立体分维数居中，位于2.15~2.34区间；散点式聚落和线形展开式聚落的立体分维数最低。综合而言，在5种东沟典型人居空间模式中，台地行列式、自由行列式及密集斑块式聚落具有人地协调、空间利用高效的双重特征，可作为沟壑区聚落空间营建的参考，但其在空间组织与地形适应性方面存在差异，需因地制宜择取适宜模式。

参考文献（References）

[1] 杨晴青, 高岩辉, 杨新军, 等. 黄土高原半干旱区微尺度乡村人居环境系统脆弱性测度及时空分异——以陕西省佳县为例[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1371-1381. [Yang Qingqing, Gao Yanhui, Yang Xinjun, et al. Measurement and spatial-temporal differentiation of vulnerability of microscale rural human settlements in the semi-arid region of the Loess Plateau: A case study of Jiaxian County, Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1371-1381.]

[2] Chen Z, Liu Y, Feng W, et al. Study on spatial tropism distribution of rural settlements in the loess hilly and gully region based on natural factors and traffic accessibility[J]. Journal of Rural Studies, 2019(2): 14, doi: 10.1016/j.jrurstud.2019.02.014.

[3] 陈棋, 薛东前, 马蓓蓓, 等. 黄土高原地区人口收缩格局与驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 258-267. [Chen Qi, Xue Dongqian, Ma Beibei, et al. Population shrinking pattern and driving forces in the Loess Plateau region[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 258-267.]

[4] 段小薇, 李小建. 山区县域聚落演化的空间分异特征及其影响因素——以豫西山地嵩县为例[J]. 地理研究, 2018, 37(12): 2459- 2474. [Duan Xiaowei, Li Xiaojian. Spatial differentiation and its influencing factors of settlements evolution in mountainous counties: A case study of Songxian County in western Henan Province[J]. Geographical Research, 2018, 37(12): 2459-2474.]

[5] 朱静静, 师学义. 黄土丘陵山区土地利用空间自相关格局及其影响因素分析——以晋城市长河流域为例[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 234-241. [Zhu Jingjing, Shi Xueyi. Analysis of spatial autocorrelation patterns of land use and influence factors in loess hilly region: A case study of Changhe Basin of Jincheng City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 234-241.]

[6] 于汉学, 周若祁, 刘临安, 等. 黄土高原沟壑区城镇体系空间结构的协调发展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2008, 38(1): 147-151. [Yu Hanxue, Zhou Ruoqi, Liu Lin'an, et al. Harmonoius development of city-town system on Loess Plateau gully areas[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2008, 38(1): 147-151.]

[7] 刘海龙, 石培基, 张学斌, 等. 基于生态承载力的黄土高原地区城镇体系空间结构演化——以庆阳市为例[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 749-756. [Liu Hailong, Shi Peiji, Zhang Xuebin, et al. Spatial structure evolution of urban system in the Loess Plateau based on ecological carrying capacity: A case study in Qingyang City[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 749-756.]

[8] 刘玲玲, 任云英. 陇东黄土高原沟壑区小城镇空间分布特征研究[J]. 华中建筑, 2018, 36(3): 66-70. [Liu Lingling, Ren Yunying. The spatial distribution characteristics of small towns in the Longdong gully region of Loess Plateau[J]. Huazhong Architecture, 2018, 36(3): 66-70.]

[9] 黄明华, 王恬, 朱亚男. 黄土高原沟壑区小城镇空间形态优化研究[J]. 规划师, 2016, 32(3): 114-119. [Huang Minghua, Wang Tian, Zhu Yanan. Optimization of urban spatial form of small towns in gullied Loess Plateau[J]. Planners, 2016, 32(3): 114-119.]

[10] 周庆华, 白钰, 杨彦龙. 新型城镇化背景下黄土高原城镇空间发展探索——以米脂卧虎湾新区为例[J]. 城市规划, 2014, 38(11): 78-82. [Zhou Qinghua, Bai Yu, Yang Yanlong. An exploration on urban space development routes in the Loess Plateau in the background of new urbanization: A case study on Wohu Ravine new district of Mizhi County[J]. City Planning Review, 2014, 38(11): 78-82.]

[11] 田达睿, 周庆华. 分形视角下黄土高原沟壑区城乡用地形态研究——以陕北米脂研究区为例[J]. 城市规划, 2017, 41(4): 33-40. [Tian Darui, Zhou Qinghua. Suitable urban-rural land use form in gully area in the Loess Plateau from the perspective of fractal theory: A case study of Mizhi, northern Shaanxi Province[J]. City Planning Review, 2017, 41(4): 33-40.]

[12] 田达睿, 谭静斌. 陕北黄土高原沟壑区城镇开敞空间分形秩序研究[J]. 城市规划, 2020, 44(7): 38-45. [Tian Darui, Tan Jingbin. Research on open space of cities at gully area in the Loess Plateau of northern Shaanxi from the perspective of fractal order[J]. City Planning Review, 2020, 44(7): 38-45.]

[13] Zhang T, Ding B, Hu Q, et al. Research on regional system planning method of rural habitat in gully regions of the Loess Plateau, under the background of rural vitalization strategy in China[J]. Sustainability, 2020, 12(8): 1-12.

[14] Zhang T. The evaluation method of gully village' ecological sustainable development in the gully regions of Loess Plateau[J]. Journal of Building Construction and Planning Research, 2016, 4(1): 1-12.

[15] 刘滨谊, 王南. 黄土高原半干旱区生态化"水-绿"双赢空间模式构建[J]. 西部人居环境学刊, 2015, 30(4): 23-28. [Liu Binyi, Wang Nan. Ecological water-green win-win spatial modes of semiarid area in Loess Plateau[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2015, 30(4): 23-28.]

[16] 刘晖. 黄土高原小流域人居生态单元及安全模式[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005. [Liu Hui. The regional small watershed units of human settlements and the security models on the Loess Plateau: Research from analyzing of the landscape pattern[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.]

[17] 虞春隆, 党纤纤. 流域视角下的黄土高原人居环境可持续性区划方法研究——以泾河流域为例[J]. 建筑学报, 2017(增刊 1): 143-147. [Yu Chunlong, Dang Xianxian. Discussion on the sustainable zoning method of human settlement base on watershed: Take the Jinghe River Basin for example[J]. Architectural Journal, 2017(Suppl. 1): 143-147.]

[18] 惠怡安. 陕北黄土丘陵沟壑区川谷型城镇空间扩展模式及其开发策略研究[D]. 西安: 西北大学, 2007. [Hui Yian. Study on the town space developing mode and exploring strategy of northern Shaanxi's Plain-valley-city in loess hill and gully area[D]. Xi'an: Northwest University, 2007.]

[19] 臧玉珠, 刘彦随, 杨园园. 山区县域土地利用格局变化及其地形梯度效应——以井冈山市为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1391-1404. [Zang Yuzhu, Liu Yansui, Yang Yuanyuan. Land use pattern change and its topographic gradient effect in the mountainous areas: A case study of Jinggangshan City[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1391-1404.]

[20] 王玲, 吕新. 基于DEM的新疆地势起伏度分析[J]. 测绘科学, 2009, 34(1): 113-116. [Wang Ling, Lü Xin. Analysis of the relief amplitude in Xinjiang based on digital elevation model[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(1): 113-116.]

[21] 朱明, 张静静, 马贺, 等. 基于DEM和均值变点法的伏牛山区地形起伏度分析[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 36-43. [Zhu Ming, Zhang Jingjing, Ma He, et al. Analysis of relief amplitude based on DEM and the mean change-point analysis method in Funiu Mountain area[J]. Journal of Henan University (Natural Science Edition), 2020, 50(1): 36-43.]

[22] Zhang J, Zhu W, Zhao F, et al. Spatial variations of terrain and their impacts on landscape patterns in the transition zone from mountains to plains: A case study of Qihe River Basin in the Taihang Mountains[J]. Science China (Earth Sciences), 2018, 61(4): 450-461.

[23] 张昳, 常庆瑞, 赵业婷, 等. 陕北黄土高原县域土地利用结构及其空间布局[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 72-78. [Zhang Yi, Chang Qingrui, Zhao Yeting, et al. Land use structure and its spatial distribution northern Shaanxi on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5): 72-78.]

[24] 田达睿. 城镇空间的分形测度与优化——基于陕北黄土高原城镇案例的研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 19-20. [Tian Darui. Measurement and optimization of urban space based on fractal theory: Case study of Loess Plateau in northern Shaanxi [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 19-20.]

[25] 田达睿, 周庆华. 分形视角下黄土高原沟壑区城乡空间发展适宜路径研究——以陕北米脂为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(5): 699-707. [Tian Darui, Zhou Qinghua. The development path of urban and rural space in the Loess Plateau from the perspective of fractal theory: A case study of Mizhi [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(5): 699-707.]

[26] 秦静, 方创琳, 王洋, 等. 基于三维计盒法的城市空间形态分维计算和分析[J]. 地理研究, 2015, 34(1): 85-96. [Qin Jing, Fang Chuanglin, Wang Yang, et al. A three dimensional box-counting method for estimating fractal dimension of urban form[J]. Geographical Research, 2015, 34(1): 85-96.]

Suitable spatial patterns for settlements in hilly-gully region of the Loess Plateau in northern Shaanxi: A case of Donggou, Mizhi County

TIAN Darui[1], TANG Hao[2], TAN Jingbin[3]

(1. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. LAY-OUT Planning Consultants Company Limited, Shenzhen 518049, Guangdong, China; 3. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The hilly-gully region of the Loess Plateau is a great challenge in the practice of new urbanization in western China. Without clarifying its regional characteristics, the intervention of modern urban planning and design has impacted the local environment and the native culture considerably. With the destruction caused by human settlements to the natural environment and the impact of modern towns on traditional settlements in the Loess Plateau of northern Shaanxi, an urgent task is to make rational use of the land in hilly-gully regions and explore the construction mode of settlements on the basis of the wisdom and experience of local people from the perspective of urban-rural integration and harmony between human beings and nature. Three-dimensional spatial characteristics in the long-term evolution of human settlements in hilly-gully regions are becoming increasingly obvious. To improve the utilization efficiency of hilly-gully land in urban construction, three-dimensional fractal analysis for organic growth of settlements has become one of the important contents of urban morphological study. With Donggou, Mizhi County, in northern Shaanxi taken as an example, this article revealed the topographical changes in Donggou and the spatial features of its settlement distribution by using the mesh method on the basis of satellite remote sensing images and digital elevation model altitude data. This work also analyzed and evaluated the coordination relationship between Donggou's topographical complexity and settlement density through four-quadrant classification, and then measured and compared the spatial efficiency of various settlement patterns by using 3D grid fractal dimension models. This work proposes that settlement samples with high grid fractal dimensions and fit into the landscape are important references in dealing with the urban spatial development problems in the hilly-gully region of the Loess Plateau. The results are as follows: (1) The settlements in Donggou exhibit obvious spatial variation from the outside to the inside; the building density and the floor area ratio first decrease then increase and decrease again as the settlements move farther away from riverbanks. (2) Overlay analysis of Donggou's topographical complexity and settlement agglomeration degree shows that the concentrated settlements on smooth terrain and the scattered settlements on complex terrain reflect a harmonious man-land relationship, and these two settlement types account for about 70.5% of the total land area of all settlements. (3) The 3D grid fractal dimension value of the settlements in Donggou is obviously segmented, while terrace parallel and free parallel settlements have the highest 3D fractal dimension value of 2.35−2.55. (4) Among the five typical spatial patterns of settlements, three efficient and appropriate patterns, terrace parallel, free parallel, and block mass types, are characterized by a harmonious man-land relationship and efficient space utilization, and can thus be used as a reference in creating settlement spaces in hilly-gully regions.

Key words: hilly-gully regions of the Loess Plateau; spatial patterns for settlements; harmonious man-land relationship; 3D grid fractal dimension; Mizhi County